

# НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 536.423+544.332

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИЗЕМНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ ПАРАМИ БУРОВОГО РОЗЧИНУ

<sup>1</sup>Л.Є. Шкіца, <sup>1</sup>Т.М. Яцишин, <sup>2</sup>О.О. Попов<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 45369,  
e-mail: [lskhitsa@nunge.edu.ua](mailto:lskhitsa@nunge.edu.ua)<sup>2</sup>Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»,  
10007 м. Житомир, просп. Миру, 59, тел. (0412) 416691, e-mail: [sasha\\_popov1982@mail.ru](mailto:sasha_popov1982@mail.ru)

Бурові розчини, що використовуються в процесі буріння нафтогазових свердловин можуть містити речовини різного класу небезпеки. Рухаючись відкритою частиною насосно-циркуляційної системи, реагенти, що входять до складу бурового розчину інтенсивно випаровуються і створюють небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу та населення прилеглих територій.

Розглянута задача визначення розподілу концентрації парів бурового розчину в приземному шарі атмосфери. За допомогою програмного математичного середовища Matlab 7 побудовано розподіл приземної концентрації компонента розчину. Отримано розподіл приземної концентрації даного компоненту, що дало змогу визначити максимум його концентрації та відстань, на якій він утворюється. Здійснено аналіз впливу стану атмосфери на рівень концентрації. Досліджено залежність інтенсивності випаровування від швидкості вітру та температури розчину.

Ключові слова: буровий розчин, математичне моделювання, інтенсивність випаровування, концентрація.

Буровые растворы, использующиеся в процессе бурения нефтегазовых скважин, могут содержать вещества разного класса опасности. Двигаясь по открытой части насосно-циркуляционной системы, реагенты, входящие в состав бурового раствора, интенсивно испаряются и создают опасность для здоровья обслуживающего персонала и населения прилегающих территорий.

Рассмотрена задача определения распределения концентрации паров бурового раствора в приземном слое атмосферы. С помощью программной математической среды Matlab 7 построено распределение приземной концентрации компонента раствора. Получено распределение приземной концентрации данного компонента, что позволило определить максимум его концентрации и расстояние, на котором он образуется. Осуществлен анализ влияния состояния атмосферы на уровень концентрации. Исследована зависимость интенсивности испарения от скорости ветра и температуры раствора.

Ключевые слова: буровой раствор, математическое моделирование, интенсивность испарения, концентрация.

Drilling fluids used in drilling oil and gas wells may contain substances of different classes of danger. Moving along the open part of the oil-circulation system chemicals that make up the mud evaporate rapidly, and cause danger to the health of staff and the surrounding area.

The task of distributing the steams concentration of boring solution in the ground layer of atmosphere was considered. With the help of the software mathematical environment Matlab 7 distribution of the ground concentration of mud component was built. The distribution of the surface concentration of the component, let us to determine the maximum concentration as well as the distance at which it is formed. The analysis of influencing the atmosphere state on the concentration level is carried out. Dependence of evaporation intensity on wind speed and mud temperature is explored.

Keywords: mud, mathematical modeling, the intensity of evaporation, concentration.

### Актуальність

На даний час нафта та газ є найбільш важливими енергоресурсами кожної промислово розвиненої країни. Видобуток цих корисних копалин із пластів земної кори здійснюється з використанням бурових установок, сучасні мо-

жливості яких дозволяють пробурити свердловини глибиною понад 5 тис. м.

Під час роботи бурової установки використовується буровий розчин (БР), що є складною багатокомпонентною дисперсною системою суспензійних, емульсійних і аерованих рідин,

які застосовуються для промивання свердловин у процесі буріння.

До складу БР входять речовини різного класу небезпеки: від 1-го (хромати, біхромати) до 4-го (натрію сульфат, діетиламін). Тобто, промивальні рідини є токсичними та небезпечними для персоналу бурової та навколишнього середовища.

В залежності від класу бурової установки, яка визначається її вантажопідйомністю і глибиною буріння, а також від складності технологічного процесу буріння установки комплектуються циркуляційними системами, які включають набір блоків, оснащених різноманітним обладнанням для приготування, очищення і регулювання властивостей бурового розчину. За допомогою схеми, описаної в [4], можна виділити частини обладнання насосно-циркуляційної системи та технічні процеси, при яких інтенсивність випаровування БР є найбільшою: процес буріння нафтових і газових свердловин, коли рух промивальної рідини жолобовою системою є інтенсивним, рідина із свердловини витікає із високою температурою 40-90°C, працює блок очищення рідини від вибуреної породи (твердої фази) і дегазатор. Під час проведення бурових операцій, зокрема після підйому на поверхню використаного БР, протікання його жолобами та проходження ним стадій очищення, а також утримання бурового шламу в шламових амбарах, відбувається забруднення приземного шару атмосфери шкідливими, небезпечними речовинами, які містяться в БР. Ці речовини потрапляють до атмосфери в процесі випаровування, який відбувається досить інтенсивно завдяки порівняно високій температурі промивальної рідини. Потім ці гази внаслідок турбулентної дифузії та під дією вітру розповсюджуються територією бурової та поза її межами, що створює великий ризик токсичної дії на обслуговуючий персонал та населення прилеглих територій. Таким чином, актуальним завданням є забезпечення екологічної безпеки функціонування бурових установок для зведення до мінімуму ризику отруєння парами БР.

Розв'язання даної задачі ґрунтується на визначенні розподілу концентрацій шкідливих речовин, що випаровуються з БР в приземний шар атмосфери та обчислення безпосередньо ризику токсичної дії.

### Постановка задачі

В матеріалах з огляду математичних моделей процесу випаровування [5] проаналізовано механізм процесу випаровування з відкритої поверхні та чинники, які впливають на нього. Виконано аналіз підходів щодо математичного опису даного процесу. Здійснено огляд найбільш відомих напівемпіричних моделей випаровування.

Пропонується спроба розгляду математичного моделювання зони впливу парів БР, який зберігається в обмеженій ємкості, наприклад в шламовому амбарі.

### Вирішення завдання

Враховується рівень концентрації парів БР у приземному шарі атмосфери, який залежить від їх інтенсивності випаровування та швидкості розсіювання в повітрі.

В основу вирішення даної проблеми покладено математичні моделі випаровування речовини та розповсюдження домішок в атмосфері.

### Модель випаровування

Згідно з дослідженням, проведеним у статті [5], на даний час не існує єдиного підходу для описання процесу випаровування. Це пов'язано з його надзвичайною складністю, що залежить від багатьох характеристик РВ та середовища над ним, відсутності чіткої уяви про деталі фізичної структури процесу, тому до цього часу не одержано повноцінної, всеохоплюючої розрахункової залежності. У зв'язку з цим набули широко застосування напівемпіричні моделі, які базуються на теоретичних положеннях основних підходів щодо опису процесу випаровування [5] та результатах обробки експериментальних даних. Дані моделі представлені у вигляді певних рекомендацій та методик щодо визначення інтенсивності випаровування за різних сценаріїв. Дані моделі дають змогу визначити параметри як стаціонарного, так і нестаціонарного процесу випаровування складових елементів багатокомпонентного розчину в атмосферу з врахуванням присутності в ній інших домішок.

Математичне моделювання буде здійснюватися для сценарію випаровування БР у рухоме повітряне середовище.

Для вирішення поставленої задачі використовуємо напівемпіричну модель, описану в [0]. Кількість шкідливих речовин  $Q_i$  [г/год], які потрапляють до атмосферного повітря, у разі випаровування їх з поверхні рідини при вимушеній конвекції газового потоку, пропонується визначати за допомогою рівняння:

$$Q_i = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1u) S p_i \sqrt{M_i} \frac{k_2}{k_1}, \quad (1)$$

де  $u$  – швидкість руху повітря над поверхнею випаровування, м/с;

$S$  – площа випаровування, м<sup>2</sup>;

$p_i$  – парціальний тиск компонентів РВ над її поверхнею, Па;

$M_i$  – молекулярна маса парів речовини, що визначається;

$k_1$  – коефіцієнт, який враховує зниження температури поверхні випаровування;

$k_2$  – коефіцієнт, який враховує ступінь закриття поверхні випаровування.

Згідно із законом Рауля парціальний тиск компонента, який входить до складу суміші, визначається за формулою

$$p_i = n_i p_{н.н.i}, \quad (2)$$

де  $n_i$  – об'ємна частка компонента в розчині;

$p_{н.н.i}$  – тиск насиченої пари речовини над чистим компонентом при заданій температурі.

Об'ємна частка компонента в розчині обчислюється за формулою

$$n_i = \frac{a_i / M_i}{\sum_{i=1}^k (a_i / M_i)}, \quad (3)$$

де  $a_i$  – масові частки компонентів;

$M_i$  – відносні молекулярні маси компонентів;

$k$  – кількість компонентів у розчині.

Залежність тиску насиченої пари чистої речовини від температури описується рівнянням Антуана

$$\lg p_{н.п.} = A - \frac{B}{C + t}. \quad (4)$$

Вкажемо розмірність величин:  $[p_{н.п.}] = [\text{мм.рт.ст.}]$ ,  $[t] = [^\circ\text{C}]$ . Для того, щоб перевести  $[\text{мм.рт.ст.}]$  у  $[\text{Па}]$ , отриманий результат потрібно помножити на 133.

Значення емпіричних коефіцієнтів  $A$ ,  $B$  та  $C$  для чистих речовин визначаються за довідниковими даними.

Коефіцієнт  $k_1$  знаходять для кожного компонента суміші за температурою його кипіння (табл. 1).

**Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта  $k_1$  від температури кипіння**

Температура кипіння $T_k$ , $^\circ\text{C}$	$\leq 80$	100	150	$>150$
Поправочний коефіцієнт $k_1$	1,5	1,3	1,1	1,0

Якщо поверхня випаровування оснащена укриттями, то кількість газів та парів, які виділяються в оточуюче середовище, потрібно визначати з урахуванням коефіцієнта  $k_2$ , який залежить від відношення  $S_1 / S_2$ , де  $S_1$  – відкрита поверхня випаровування,  $[\text{м}^2]$ ;  $S_2$  – повна поверхня випаровування,  $[\text{м}^2]$ .

Значення поправочного коефіцієнта  $k_2$  наведені в табл. 2.

**Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта  $k_2$  від відношення  $S_1/S_2$**

$S_1 / S_2$	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,5	0,8	$>0,8$
$k_2$	0	0,01	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0

### Модель розсіювання парів в атмосфері

Для вирішення задачі розподілу концентрації ЗР, які надходять в атмосферу міста від різних джерел забруднення, використовуються різні підходи та методи.

В прикладних розрахунках для визначення поля концентрацій ЗР реальні джерела викидів зазвичай моделюють точковими, лінійними або площинними джерелами. Найпростішою моделлю для визначення поля концентрацій від

неперервно діючого чи миттєвого джерела, що вимагає мінімального набору вхідних даних, є Гауссова модель для точкового джерела, яка широко відома і в різних модифікаціях часто використовується в практичних розрахунках.

Досить детально Гауссова модель описана в роботах [0, 0].

Математична форма Гауссової моделі для визначення розподілу концентрації ЗР від викидів стаціонарних ДЗ має такий вигляд:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (5)$$

де  $Q$  – потужність неперервного джерела, г/с;

$u$  – швидкість вітру на висоті  $H_{ef}$ , м/с;

$H_{ef}$  – ефективна висота підйому, м;

$\sigma_y$  – горизонтальна дисперсія, м;

$\sigma_z$  – вертикальна дисперсія, м.

Формули для визначення  $\sigma_y(x)$  та  $\sigma_z(x)$

мають вигляд:

$$\sigma_y(x) = a_1 x (1 + b_1 x)^{-1/2}, \quad \sigma_z(x) = a_2 x (1 + b_2 x)^{c_2}. \quad (6)$$

Значення коефіцієнтів  $a_i$ ,  $b_i$  ( $i=1, 2$ ) та  $c_2$  залежать від класу стійкості атмосфери [0].

### Модельний приклад

Використовуючи програмне середовище Matlab, виконаємо математичне моделювання процесу розповсюдження парів БР в атмосфері на території, прилеглої до бурової, та дослідимо вплив основних факторів на розподіл концентрації. Для цього розглянемо наступний модельний приклад.

**Вихідні дані.** Герметичний амбар розміром 2х5х1 м заповнений сумішшю рідин, які є складовими БР, % (мас.): вода - 30, бензол - 50, толуол - 20. Амбар знаходиться на відкритій місцевості. Температура рідини - 40 $^\circ\text{C}$ . Температура повітря - 20 $^\circ\text{C}$ . Швидкість вітру над поверхнею випаровування становить  $u = 10$  м/с. Стан атмосфери – нестійкий.

При моделюванні вважаємо, що амбар є точковим джерелом забруднення, який неперервно здійснює викиди з однаковою потужністю, до того моменту, поки весь розчин випарується. Тобто, розглядаємо стаціонарний процес розповсюдження домішок в атмосфері. Також, вважаємо, що розповсюдження домішок відбувається над рівною поверхнею землі без будь-яких перешкод. Пари БР вважаємо інертними, тобто такими, що не вступають у фізико-хімічну взаємодію та оточуючим середовищем.

За довідниковими даними знаходимо відповідні характеристики компонентів БР, які зведені до табл. 3.

Знаючи температуру кипіння, за даними табл. 1. знаходимо поправочний коефіцієнт для

Таблиця 3 – Характеристики компонентів БР

Характеристика	Компонента розчину		
	вода	бензол	толуол
Відносна молекулярна маса	18,015	78,10	92,14
Температура кипіння, °C	100	80,3	110,8
Константи Антуана	$A = 7,9608$	$A = 6,912$	$A = 6,953$
	$B = 1678$	$B = 1214,6$	$B = 1343,9$
	$C = 230$	$C = 221,2$	$C = 219$

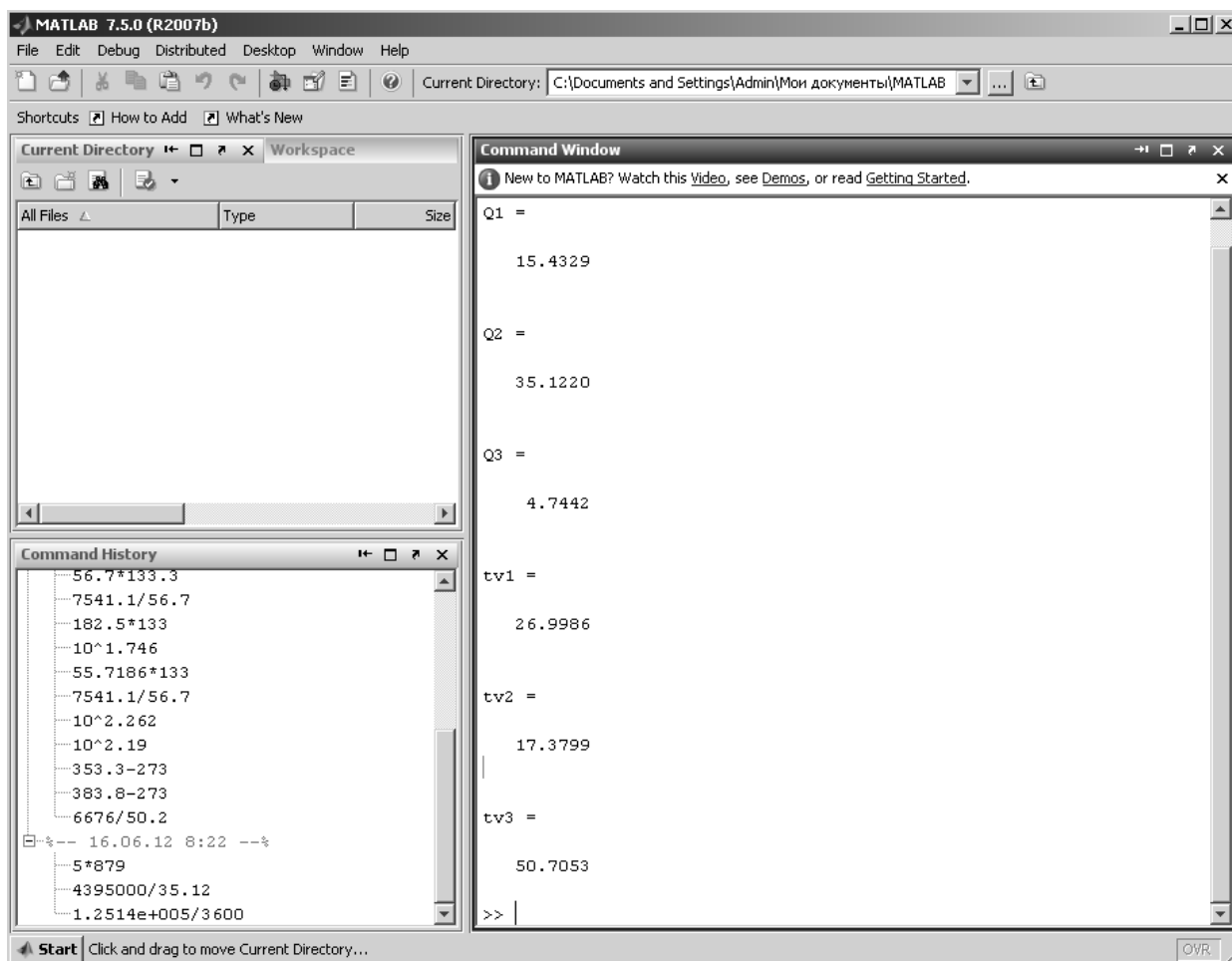


Рисунок 1 – Інтенсивність (г/с) та час (год) випаровування для кожного з компонентів розчину

кожної складової БР: для води –  $k_1 = 1,3$ , бензолу –  $k_1 = 1,5$ , толуолу –  $k_1 = 1,3$ .

Оскільки вважаємо шламовий амбар відкритою ємністю, то згідно з табл. 2  $k_2 = 1$ .

Що стосується коефіцієнтів у формулах (6), то для нестійкого стану атмосфери вони становлять відповідно:  $a_1 = 0,32$ ;  $b_1 = 0,0004$ ;  $a_2 = 0,24$ ;  $b_2 = 0,0001$ ;  $c_2 = 0,5$  [0, 0].

Для математичного моделювання в програмному середовищі Matlab створено програму для розрахунку інтенсивності та часу випаровування кожного компоненту розчину, а також графічно побудовано розподіл приземної концентрації парів суміші. Дана програма реалізує описані вище моделі.

На рис. 1 відображено результат розрахунку цих параметрів на основі даних модельного прикладу вищезазначених характеристик компонентів розчину та відповідних коефіцієнтів.

Як видно з обчислень, найбільшу інтенсивність завдяки найбільшому парціальному тиску має бензол  $Q_2 = 35,122$  г/с – речовина, що випаровується найшвидше (час випаровування становить біля 17 годин). Найменшу інтенсивність ( $Q_3 = 4,7442$  г/с) та найбільший час випаровування (близько 50 год) має толуол. Таким чином, можна зробити висновок, що за таких умов весь розчин випарується приблизно за 50 годин.

Побудуємо розподіл концентрації бензолу на поверхні землі, приймаючи, що метеороло-

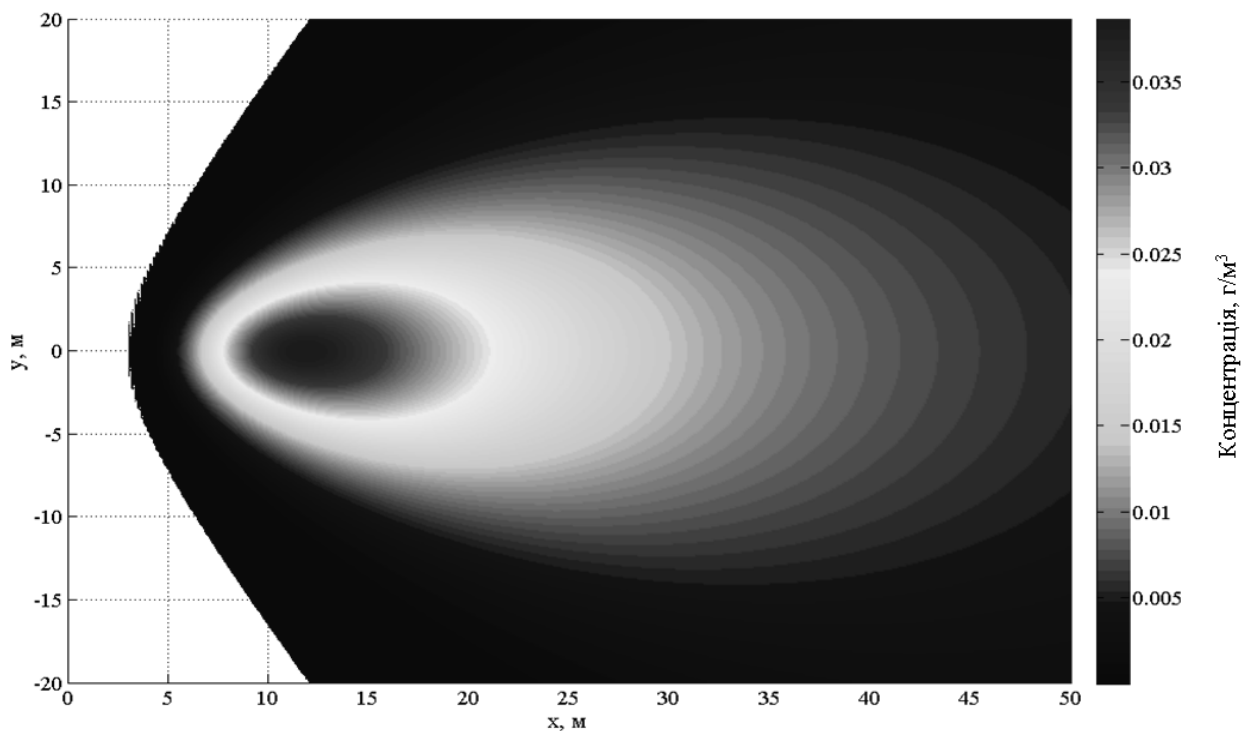


Рисунок 2 – Розподіл приземної концентрації бензолу

гічні умови протягом всього часу випаровування залишаються незмінними. Тоді, протягом всього часу випаровування встановиться стаціонарний режим розповсюдження його парів.

На рис. 2 відображено розподіл концентрації парів бензолу на поверхні землі під дією вітру (амбар знаходиться на початку координат).

Як видно з даного рисунку, під дією вітру, напрямком якого приймаємо спрямованим вздовж осі  $Ox$ , розподіл приземної концентрації бензолу має витягнутий характер. Завдяки тому, що температура молекул бензолу, які змогли подолати міжфазну межу, вища температури зовнішнього середовища, ці молекули підіймаються на певну висоту і переносяться вітром на певну відстань. Внаслідок цього підвищена концентрація бензолу на поверхні землі наявна не одразу біля поверхні випаровування, а на деякій відстані від неї, що і видно на рисунку. Як бачимо, на відстані близько 12 м від поверхні випаровування спостерігатиметься максимум концентрації бензолу, який становить приблизно  $0,04 \text{ г/м}^3$ . Зі збільшенням відстані концентрація парів зменшується.

На рис. 3 відображено результат порівняння розподілу концентрації бензолу за нестійкого, стійкого та рівноважного станів атмосфери.

Як видно з рис. 3, максимальна приземна концентрація від випаровування бензолу при інших рівних умовах у випадку нестійкого стану атмосфери більше, ніж при інших станах. Це пояснюється тим, що нестійкий стан атмосфери характеризується значним рівнем турбулентності з вихорами значних розмірів, які швидко переносять домішки до поверхні землі. Тому і максимум концентрації за нестійкого стану атмосфери ближчий до поверхні випаровування,

ніж за інших станів. Далі рівень концентрації стрімко спадає.

При рівноважному стані рівень турбулентності менший, ніж за нестійкого стану, через що домішки не так швидко переносяться до земної поверхні вихорами повітря, тому відбувається зменшення максимуму концентрації та віддалення його від джерела забруднення.

При стійкому стані турбулентність пригнічується, інтенсивність дифузійних процесів знижується. Домішки пізніше досягають поверхні землі, розсіюючись в атмосфері, що і підтверджується меншим рівнем приземної концентрації.

На рис. 4 показана залежність інтенсивності випаровування від швидкості вітру для кожного компоненту розчину.

Як видно з даного рисунку, інтенсивність випаровування зростає зі збільшенням швидкості вітру, що підтверджується експериментально.

Вітер вириває молекули пари з шару, який безпосередньо прилягає до поверхні рідини, збільшуючи цим інтенсивність випаровування.

На рис. 5 показана залежність інтенсивності випаровування від температури розчину.

Зі збільшенням температури суміші інтенсивність випаровування зростає, оскільки збільшується кількість молекул, які можуть подолати міжфазну границю.

### Висновки

1. Розглянута задача визначення розподілу приземної концентрації парів бурового розчину, який зберігається у відкритому шламовому амбарі.

2. На умовах модельного прикладу за допомогою відомої напівемпіричної моделі випа-

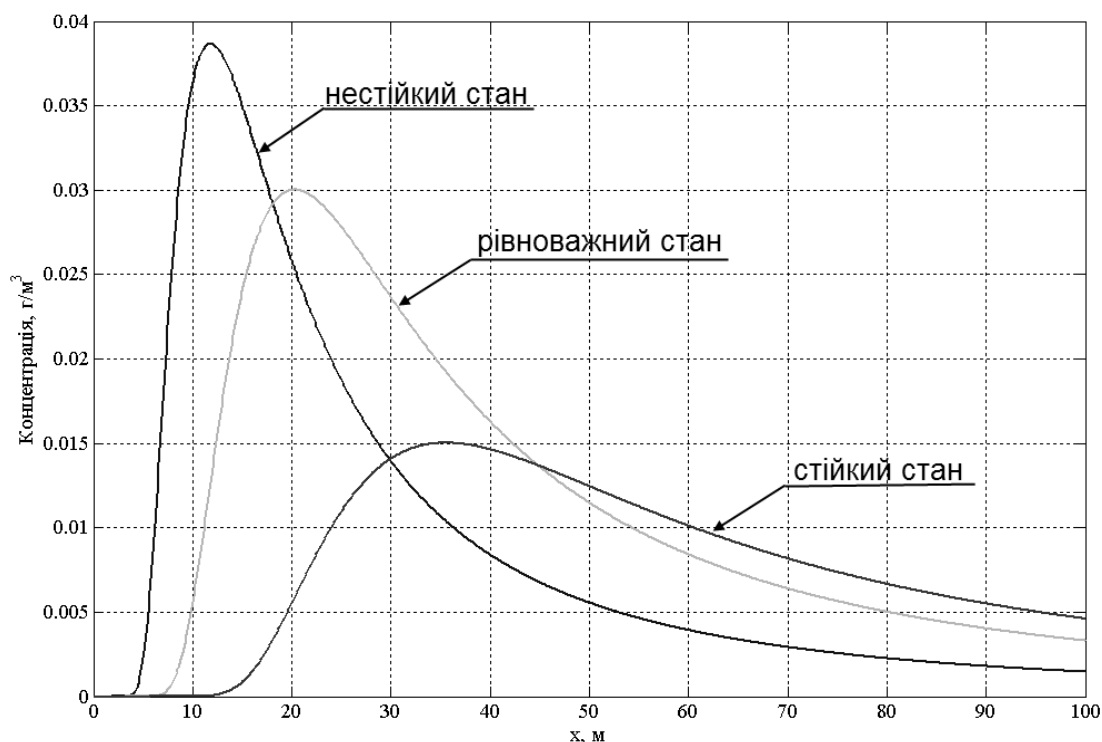


Рисунок 3 – Розподіл концентрації бензолу вздовж напрямку вітру за різних станів атмосфери

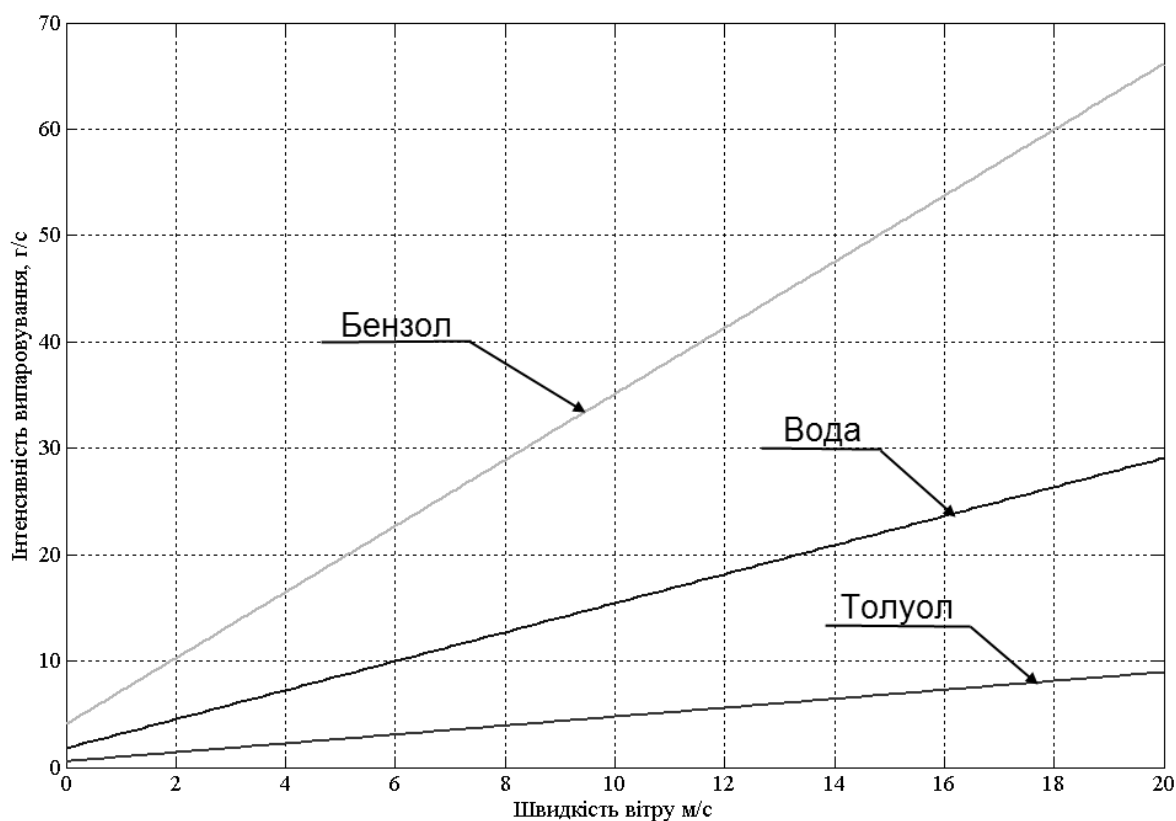


Рисунок 4 – Залежність інтенсивності випаровування від швидкості вітру

ровування та Гауссової моделі розсіювання домішок в атмосфері, реалізованих в програмному математичному середовищі Matlab 7, здійснено наступне:

– визначено інтенсивність та час випаровування кожного компонента бурового розчину;

– отримано розподіл приземної концентрації бензолу, що дало змогу визначити максимум його концентрації та відстань, на якій він утворюється;

– здійснено аналіз впливу стану атмосфери на рівень концентрації бензолу;

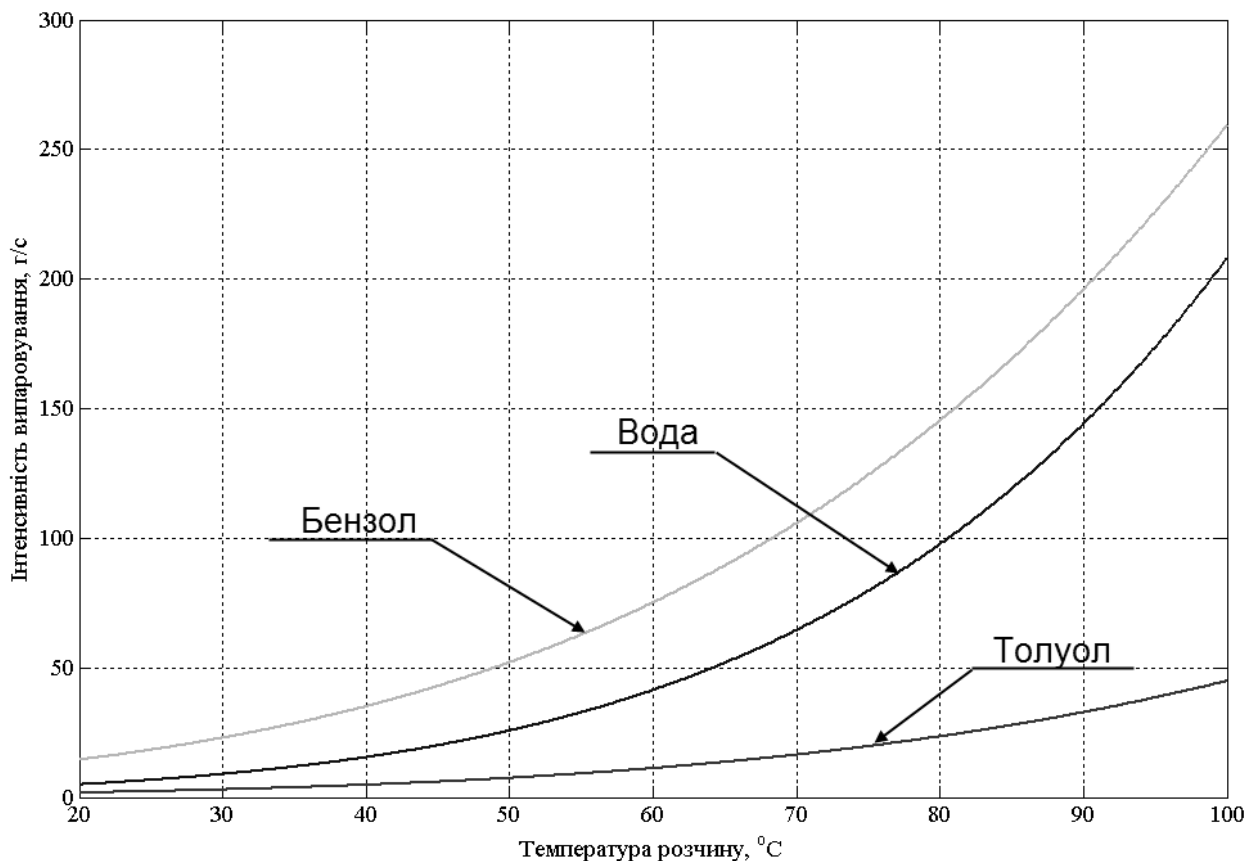


Рисунок 5 – Залежність інтенсивності випаровування від температури розчину

– досліджено залежність інтенсивності випаровування кожного компоненту розчину від швидкості вітру та температури розчину.

Дана робота дає можливість оцінити ризик токсичної дії випарів БР на обслуговуючий персонал та населення прилеглих територій. Тому подальші дослідження будуть проводитися з метою покращення екологічної безпеки функціонування обладнання насосно-циркуляційної системи бурових установок для зведення до мінімуму ризику забруднення парами БР.

### Література

1 Бруязкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – Киев: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

2 Каменева І. П. Моделювання забруднення атмосфери на основі Гауссового розподілу концентрацій / І. П. Каменева, О. О. Попов, А. В. Яцишин // Моделювання та інформаційні технології. – 2008. – Вип. 49. – С. 24–31.

3 Тищенко Н. Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: Справ. изд. / Н. Ф. Тищенко. – М.: Химия, 1991. – 368 с.

4 Шкіца Л.Є. Дослідження забруднення атмосфери випарами бурового розчину // Л.Є. Шкіца, Т.М. Яцишин // Збірник наукових статей III всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю, м. Вінниця. – 2011. – Том 2. – С. 554-557.

5 Яцишин Т. М. Огляд математичних моделей процесу випаровування / Т.М. Яцишин // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2012.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.09.12

Рекомендована до друку професором  
Я.М. Семчуком